بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های فلزی مجهز به مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه*

محمّدحسین برادران خلخالی[۱] عبّاس کرم‌الدّین[۲]

چکیده مهاربندهای مرکزگرا از جمله سیستم‌های ساختمانی هستند که سبب کاهش جابه‌جایی نسبی ساختمان پس از زمین‌لرزه می‌گردند. در این پژوهش پس از بررسی و مطالعهٔ تمامی سیستم‌های مرکزگرا، به‌صورت تخصصی رفتار کلیهٔ مهاربندهای مرکزگرای پیشنهادی توسط محقّقین پیشین مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که مهاربندهای پیشنهادی قبلی همگی نقطه‌ضعف‌هایی دارند. برخی از این نکات عبارت‌اند از: دشواری ساخت، هزینهٔ بالا، جذب انرژی پایین و ظرفیت محدود نیروی محوری. در این پژوهش مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه (DT-SCED) (Double Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace) پیشنهاد گردید. این مهاربند نسبت به نمونه‌های پیشین دارای قابلیت‌های بهتری است. برخی از نکات مثبت این مهاربند عبارت است از: سادگی ساخت متناسب با امکانات ساخت در ایران، هزینهٔ پایین ساخت، ظرفیت بالای نیروی محوری، جذب انرژی بالا و قابلیت توسعه. در این پژوهش پس از محاسبهٔ جزییات طراحی مهاربند پیشنهادی، مدل دوبعدی آن در نرم‌افزار OPENSEES مدل‌سازی گردید. برای مدل‌سازی مهاربند از ده المان یک‌بعدی استفاده گردید. پس از راستی آزمایی مدل‌سازی، مهاربند تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت و نمودار چرخه‌ای (هیسترسیس) آن محاسبه گردید. همچنین یک نمونه ساختمان شش طبقه با سیستم مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه طراحی و تحلیل گردید. عملکرد لرزه‌ای ساختمان نمونه با دو نمونه از مهاربندهای پیشنهادی قبلی مقایسه گردید. پارامترهای مورد مقایسه عبارت بودند از: زمان تناوب سازه، مقدار نیروی فعّال شدن مهاربند، شکل‌پذیری سازه، ضریب اضافه مقاومت سازه، بیشینه شتاب، بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات، بیشینه جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده طبقات و بیشینه برش پایه. نتایج تحلیل مهاربند پیشنهادی بیان‌کنندهٔ رفتار مرکزگرا و نمودار چرخه‌ای پرچمی شکل با ظرفیت نیروی محوری بالا برای مهاربند پیشنهادی بود. همچنین عملکرد لرزه‌ای مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه در سازه بسیار مطلوب ارزیابی شد.

واژه‌های کلیدی مهاربند مرکزگرا، تحلیل سختی، تحلیل استاتیکی غیرخطی، شکل‌پذیری، قاب فولادی، طراحی لرزه‌ای.

Seismic Response of Multistory Buildings with Double Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace (DT-SCED)

M. H. Baradaran Khalkhali A. Karamodin

Abstract *Telescopic Self-Centering braces are one of the very successful examples of Self-Centering braces which perform well in seismic loading. In this study, a new example of Telescopic Self-Centering brace is introduced, which has superior features over other telescopic braces. These include: high axial load capacity, use of shorter cables in brace construction, simplicity of construction, use of separate cables for compressive and traction modes, less fatigue in cyclic loads and, allowing for more dynamic loading cycles. In this paper, a sample was designed with an axial force capacity of 300kN. Modeling of behavior (DT-SCED) was accurately expressed using numerical relationships. nonlinear incremental stiffness analysis method was also used to calculate the hysteresis brace behavior. The cyclic load test was applied to this brace and the result showed complete Self-Centering behavior. Then, a sample building with the double telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace (DT-SCED) was subjected Single direction pushover analyses and the results are compared with the sample buildings with the Self-Centering Energy-Dissipative Bracing (SCED) and the Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Bracing (T-SCED). The results of the analysis and comparing with other samples confirm the seismic superiority of performance of the DT-SCED brace over other samples.*

Keyword Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace, pushover Analysis, Cyclic Load Test, Nonlinear Incremental Stiffness Analysis.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۲/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/٤/۲۱ می‌باشد.

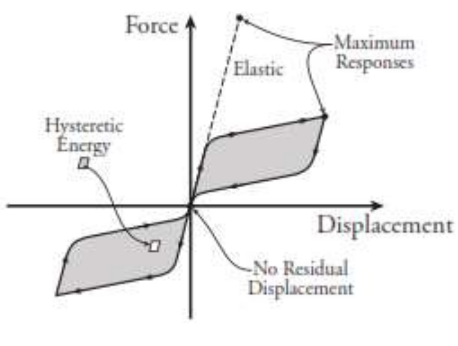
(۱) دانشجوی دوره دکتری، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

Email: a-karam@um.ac.ir

مقدّمه

در دو دهۀ اخیر یکی از موضوعات مورد بررسی محقّقان در زمینۀ کنترل رفتار سازه در برابر زلزله بوده است. در طراحی سازه‌ها، نحوۀ عملکرد درحین زلزله و وضعیت بهره‌برداری آن پس از زلزله دارای اهمّیّت است. همان‌طور که می‌دانید طراحی سازه‌های بااهمّیّت بالا مانند بیمارستان‌ها و مدارس باید به شکلی باشد که پس از زلزله قادر به بهره‌برداری باشند و همین موضوع باعث می‌شود که طراحی بر اساس عملکرد، اهمّیّت بیشتری پیدا کند. یکی از موضوعاتی که اخیراً مورد بررسی محقّقان قرار گرفته شده است سازه‌های مرکزگرا است. سیستم‌های مرکزگرای مقاوم در برابر زلزله علاوه بر توانایی اتلاف انرژی باعث بازگشت ساختمان به جایگاه اصلی خود پس از زلزله می‌شود، شکل (۱) نشان‌دهندۀ رفتار چرخه-ای یک سیستم مرکزگرا است. این روش نسبتاً جدید مفهوم امیدوارکننده‌ای از طراحی لرزه‌ای را بازگو می-نماید. سیستم‌های مرکزگرا به‌طورکلّی به سه دستۀ عمده تقسیم می‌شوند: الف) سیستم‌های همراه با عناصر فولادی پس تنیده افقی که در محل اتصال خمشی به کار می‌روند و باعث افزایش شکل‌پذیری سازه در زمان زلزله می‌گردد. ب) سیستم گهواره‌ای با یا بدون اعضای پس تنیده عمودی که به سازه اجازه می‌دهد از محل فونداسیون در حین زلزله به سمت بالا و پایین حرکت کند. ج) سیستم مهاربندی همراه با مهاربندهای مرکزگرا که سبب کاهش جابه‌جایی نسبی ساختمان پس از زلزله می‌گردد [1]. در سال ۱۹۹۳ نیمس و همکاران در دانشگاه برلکی کالیفرنیا اوّلین نمونۀ مهاربند مرکزگرا را معرفی نمودند. در مهاربند معرفی‌شده توسط آنها یک سری فنرهای اصطکاکی وظیفۀ اتلاف انرژی و بازگرداندن مهاربند پس از باربرداری را داشتند [1]. از مهم‌ترین معایب مهاربند معرفی‌شده توسط آنها سختی ساخت و وجود ظرفیت نیروی محوری پایین در حدود ۱٫۵ کیلونیوتن بود. در سال ۱۹۹٤ تیسوپلاس و همکاران مهاربند مرکزگرا همراه با مایع مستهلک‌کنندۀ انرژی را پیشنهاد نمودند [2]. ایدۀ اوّلیۀ این نوع مهاربند مربوط به ارتش آمریکا در سال ۱۹۷۰ بود که توسط آنها گسترش یافت؛ بزرگ‌ترین نقطه‌ضعف این طرح پیشنهادی نیز کماکان ظرفیت نیروی محوری پایین در حدود ۱۵ کیلونیوتن بود. در سال ۲۰۰۰ فیلیاتورالت و همکاران مهاربند مرکزگرا با فنرهای اصطکاکی را پیشنهاد نمودند، در این طرح وظیفۀ فنرها تأمین نیروی لازم برای بازگشت مهاربند پس از بارگذاری به نقطۀ اوّلیه و استهلاک انرژی بود که البته این مدل پیشنهادی نیز قابلیت آزمایش در ابعاد واقعی را نداشت [3]. در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ کریستوپلوس و همکاران بر روی سازه‌های مرکزگرا تحقیقات فراوانی را انجام دادند و در سال ۲۰۰۸ یک نمونه مهاربند مرکزگرا را معرفی نمودند [4,5,6]. مهاربند معرفی‌شده (SCED) (Self-Centering Energy-Dissipative Brace) ظرفیت نیرویی مناسبی داشت، اما کماکان یکی از مشکلات مهاربند پیشنهادی دشواری ساخت بود. همچنین در سال ۲۰۰۵ افراد دیگری همچون روژاست و همکاران نیز بر روی سازه‌های مرکزگرا پژوهش نمودند و نتایج به‌دست‌آمده از کار آنها نیز شامل محدود نمودن جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده سازه‌ها بود [7].



شکل (۱): شماتیک رفتار چرخه‌ای یک سیستم مرکزگرا [17]

در سال ۲۰۰۸ ژو و ژانگ یک نمونه مهاربند

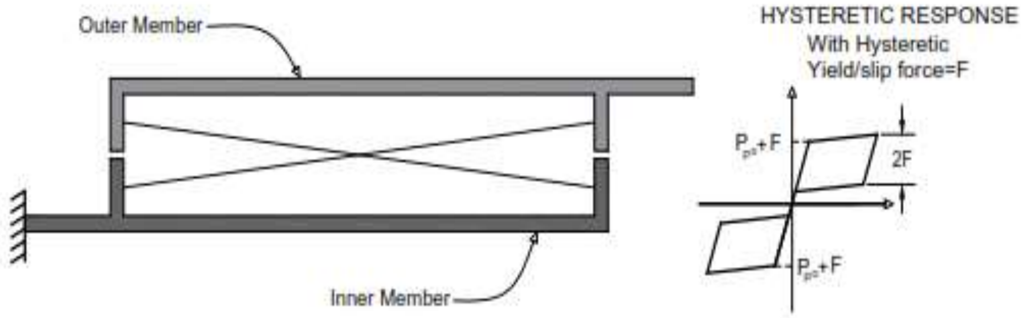
مرکزگرا را معرفی نمودند که در آن از کابل‌های با جنس SMA استفاده شده بود، از نکات حائز اهمّیّت این طرح پژوهشی رفتار بسیار خوب پرچمی‌شکل نمودار چرخه‌ای مهاربند بود. البته این نمونه پیشنهادی نیز قابلیت آزمایش واقعی را نداشت و ظرفیت نیروی محوری آن در حدود ۹ کیلونیوتن بود [8]. اروکو و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی به همراه مهاربندهای مرکزگرا پرداختند [9]. آنها در این پژوهش از دو نرم‌افزار عددی OPENSEES و نرم‌افزار تجاری SAP2000 برای مدل‌سازی استفاده نمودند. در هردو نرم‌افزار پاسخ مناسبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی استخراج نمودند. پس از بررسی اطّلاعات، آنها نتیجه گرفتند که میزان جابه‌جایی نسبی طبقات در سازۀ مرکزگرا برای ۱۲ زلزله اعمالی بین ۲ تا ٤ درصد است، همچنین رفتار لرزه‌ای سازه از جمله جابه‌جایی نسبی، شتاب، نیروی ایجادشده در تیر و ستون به‌خوبی در نرم‌افزارهای اجزای محدود پیش‌بینی گردیده است. در سال ۲۰۱٤ اروکو و همکاران کار خود را بر روی یک نمونه مهاربند مرکزگرای تلسکوپی آغاز نمودند (T-Telescoping Self-Centering Energy-) (SCED Dissipative Brace)، آنها در این پژوهش تلاش نمودند یک نمونه مهاربند مرکزگرا را طراحی نمایند تا علاوه بر ایجاد خاصیت مرکزگرایی در سازه امکان شکل‌پذیری بیشتری در سازه ایجاد نمایید و جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده سازه را نیز به نحو قابل توجّهی کاهش دهد [9]. در سال ۲۰۱٦ آلم (Alam) و همکاران یک نمونه مهاربند جدید را طراحی نمودند. آنها در این پژوهش قصد داشتند با توجّه به هزینه‌های زیادی که پس از تخریب سازه در زمان وقوع زلزله در ساختمان‌های عظیم ایجاد می‌شود، ابزاری را در سازه استفاده نمایند که علاوه بر هزینۀ کم اجرایی، جابه‌جایی و جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده را نیز کاهش دهد [10]. آنها با توجّه به الگوی کمک‌فنرهای استفاده‌شده در سیستم تعلیق خودرو و آلیاژهای حافظه در شکلی در محیط نرم‌افزار آباکوس یک سیستم جدید مهاربندی را پیشنهاد نمودند. آنها پس از بررسی اطّلاعات به‌دست‌آمده به این نتیجه رسیدند که استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی باعث افزایش خاصیت مرکزگرایی می‌گردد، شکل‌پذیری سازه افزایش می‌یابد و میزان میرایی مهاربند نیز به علّت رفتار پیستونی آن افزایش می‌یابد. نقطۀ اشتراک تحقیقات افراد بالا حذف و کاهش جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده در سازه‌ها بوده است. باید خاطرنشان نمود که این جابه‌جایی‌های نسبی در سازه به علّت بروز زلزله در سازه‌ها ایجاد گردیده شده است. مقالات یادشده نشان می‌دهند که مهم‌ترین عامل قابل اندازه‌گیری بعد از زلزله جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده در سازه است. تحقیقات اخیر نیز نشان می‌دهد چنانچه میزان جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده در سازه پس از زلزله کمتر از ۰/۵ درصد باشد، هزینۀ بازسازی و آماده‌سازی سازه برای بهره‌برداری بسیار زیاد کاهش پیدا می‌نماید [13,14,15].

هدف از این پژوهش معرفی، طراحی و تحلیل یک نمونه مهاربند مرکزگرا است که ویژگی‌های مثبتی نسبت به نمونه‌های پیشین داشته باشد. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از: ظرفیت نیروی محوری بالا، استفاده از کابل کمتر در مهاربند، سادگی ساخت متناسب با امکانات موجود در ایران و استفاده از کابل های مجزا برای حالت های فشاری و کششی مهاربند.

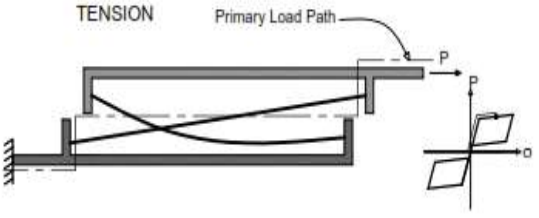
معرفی مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه

پس از بررسی کلیۀ مهاربندهای مرکزگرا پیشین، با توجّه به متریال موجود و امکانات ساخت در ایران، مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دو طرفه (DT-SCED) (Double Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace) پیشنهاد گردید. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد مهاربندهای پیشنهادی قبلی همگی دارای چندین نکته منفی از جمله: دشواری ساخت، هزینۀ بالا، جذب انرژی پایین و ظرفیت محدود نیروی محوری بودند. در مهاربند

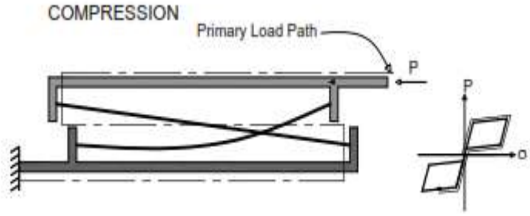
پیشنهادی از عملکرد تلسکوپی اروکو و همکاران استفاده شده است با این تفاوت که از اتصالات بسیار ساده‌تری برای ساخت در آن استفاده می‌گردد [9]. در این مهاربند برای ایجاد عملکرد کششی در کابل‌ها در حین بارگذاری کششی و فشاری از ایدۀ مطرح‌شده در مهاربند پژوهشی ژو و ژانگ در سال ۲۰۰۸ استفاده شده است [8]. برای این منظور از ٤ دسته کابل کمک گرفته شده است که دو دسته از این کابل‌ها در کشش و دو دسته دیگر نیز در فشار فعّال می‌شوند. شکل (۲) به‌صورت شماتیک رفتار مهاربند را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد در مهاربند (DT-SCED) از یک عضو I شکل به‌عنوان عضو درونی و یک عضو قوطی شکل به‌عنوان عضو بیرونی استفاده شده است. هر دسته از کابل‌ها توسط دو نبشی به عضو داخلی و خارجی متصل می‌گردند و در بارگذاری کششی و فشاری پس از غلبۀ نیروی محوری به نیروی اصطکاکی میان عضوهای داخلی و خارجی، کابل‌ها فعّال می‌شوند. مزیّت این نوع مهاربند نسبت به نمونه‌های پیشین استفاده از کابل‌های کمتر و نصف نمودن میزان خستگی در کابل‌ها به علّت کابل‌های کششی و فشاری مجزا است. ساخت و نصب آسان این مهاربند از دیگر مزایای این طرح نسبت به طرح‌های پیشین است که امکان ساخت آن را در ایران به‌سادگی میّسر می‌سازد.



(الف)

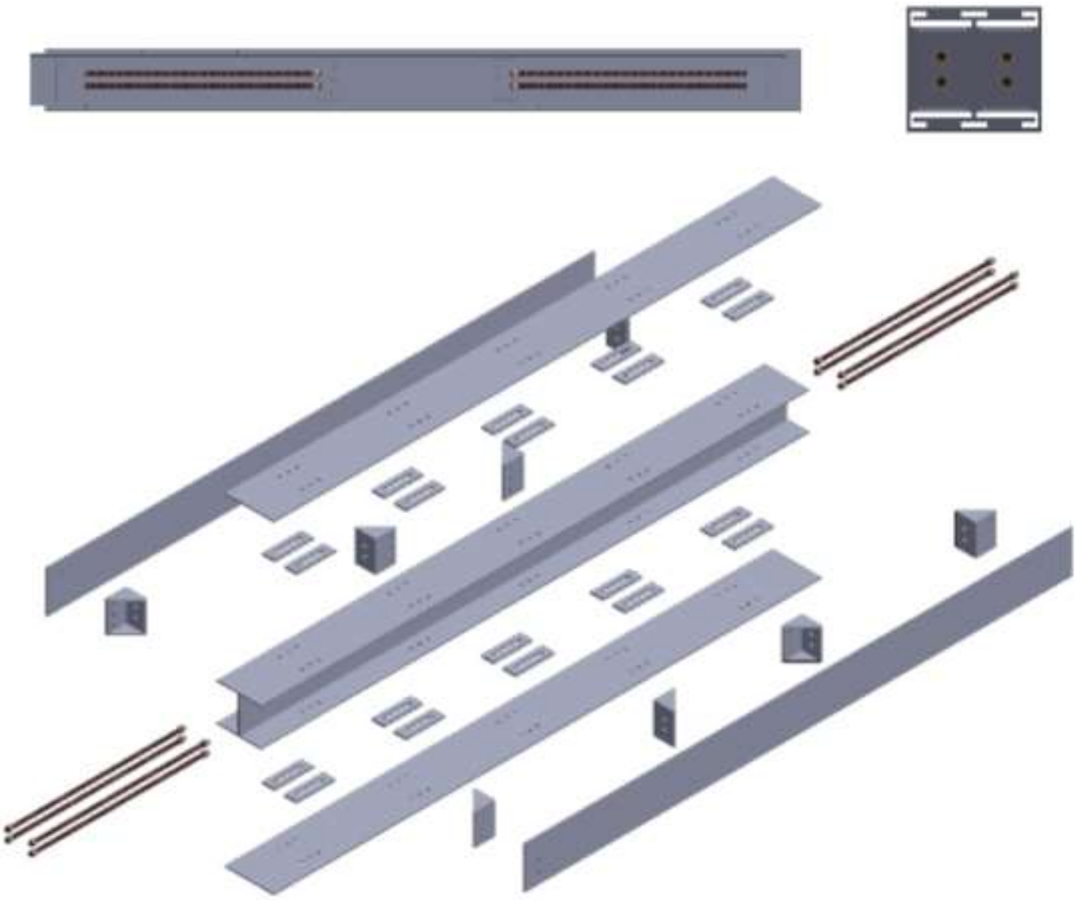


(ب)



(ج)

شکل (۲): شکل شماتیک مهاربند مرکزگرا: الف) حالت بدون بارگذاری، ب) بارگذاری کششی، ج) بارگذاری فشاری



شکل (۳): شکل جزئیات مهاربند مرکزگرای پیشنهادی (DT-SCED): الف) مقطع مهاربند، ب) وجه جانبی مهاربند، ج) اجزای مورد نیاز در ساخت مهاربند

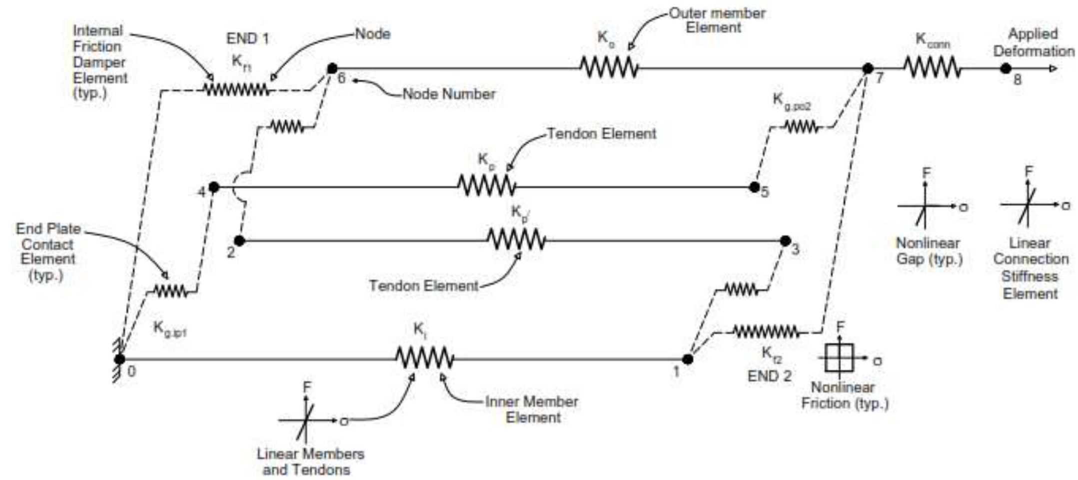
صحّت‌سنجی نحوهٔ مدل‌سازی مهاربند (DT-SCED)

در این پژوهش برای صحت‌سنجی نحوه مدل‌سازی مهاربند مرکزگرای (DT-SCED) در نرم‌افزار اجزای محدود از دو نمونهٔ پژوهش آزمایشگاهی مشابه استفاده شد، لذا برای تعیین نمودار چرخه‌ای مهاربند (DT-SCED) از تحلیل سختی غیر خطی در نرم‌افزار OPENSEES استفاده شده است. ماتریس سختی مهاربند پیشنهادی نیز بر اساس المان‌های شکل ٤ برپا گردیده است. کلیهٔ المان‌ها به‌صورت یک‌بعدی است اما در تصویر به‌صورت دوبعدی نمایش داده شده است. سختی عضو داخلی، خارجی و کابل‌ها که به ترتیب با K_i، K_o و K_p در شکل (٤) مشخص شده‌اند و به‌صورت المان یک‌خطی در نظر گرفته شده است. فاصلهٔ میان عضوها و کابل‌ها نیز با المان دوخطی (K_g) در نظر گرفته شده است. همچنین سختی ناشی از اصطکاک میان عضو داخلی و خارجی نیز با المان دوخطی K_f مشخص شده است. نخستین گام تحلیل مهاربند تعیین میزان نیروی لازم برای غلبه بر پیش‌تنیدگی است. در این مرحله فرض می‌شود که قبل از غلبه بر نیروی پیش‌تنیدگی، مهاربند فعّال نمی‌گردد و هیچ‌گونه اصطکاک میان عضو داخلی و خارجی ایجاد نمی‌شود. بارگذاری نیز به‌صورت گام‌های کوچک به سازه وارد می‌گردد و درنهایت یک ماتریس سختی و یک ماتریس بارگذاری برای مهاربند برپا می‌شود. باید خاطرنشان نمود نمودار نیرو جابه‌جایی هر یک از المان‌ها قابل ترسیم است. برای محاسبهٔ رفتار چرخه‌ای مهاربند

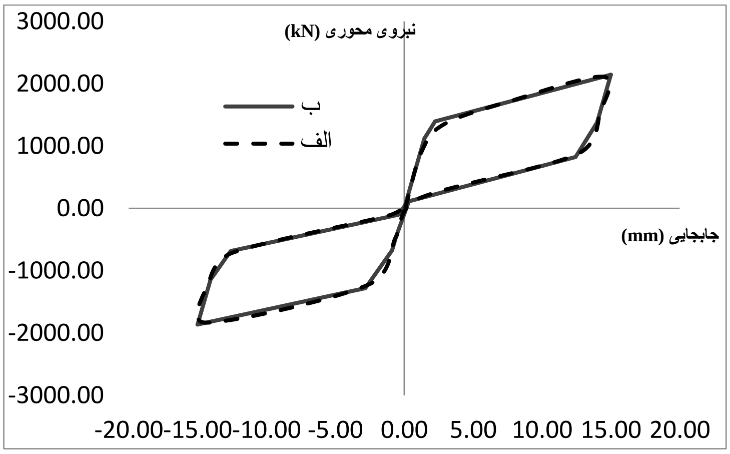
نقطهٔ o تکیه‌گاه و نقطهٔ ۷ در شکل (٤) نقطهٔ هدف است و جابه‌جایی نسبی این دو نقطه کنترل می‌شود. برای هر گام چرخه چرخه‌ای مهاربند یک ماتریس نیرو و یک ماتریس سختی تشکیل می‌گردد و به‌وسیلهٔ آن موقعیت دوسر مهاربند از یکدیگر مشخص می‌شود.

برای صحّت‌سنجی نحوه مدل‌سازی و دقّت نرم‌افزار یک نمونه مهاربند مرکزگرای تلسکوپی که در سال ۲۰۱٤ توسط اروکو و همکاران تحت آزمایش جک دینامیکی قرار گرفته بود، مدل‌سازی و تحلیل شد [11].

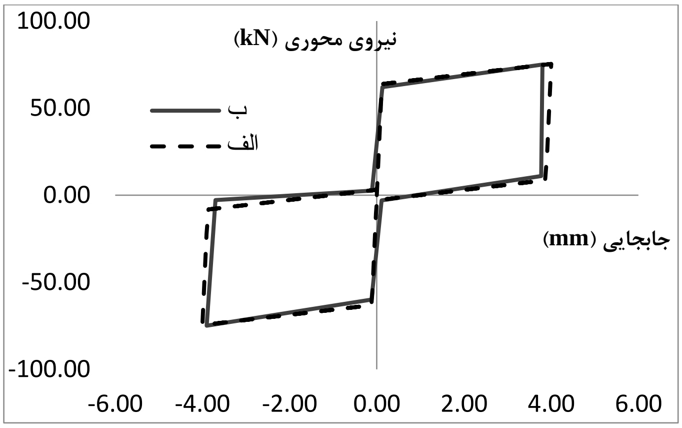
همان‌طور که در شکل (٥) مشخص است نتایج از دقّت بالایی برخوردار بودند. برای کنترل بیشتر یک نمونه مهاربند مرکزگرا را که در سال ۲۰۱٤ توسط اروکو و همکاران درون یک قاب سه‌طبقه تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار گرفت و مدل‌سازی شد که نمودار چرخه‌ای مهاربند طبقه میانی در شکل (٦) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد مدل‌سازی و تحلیل با دقّت بسیار زیاد و قابل قبول است.



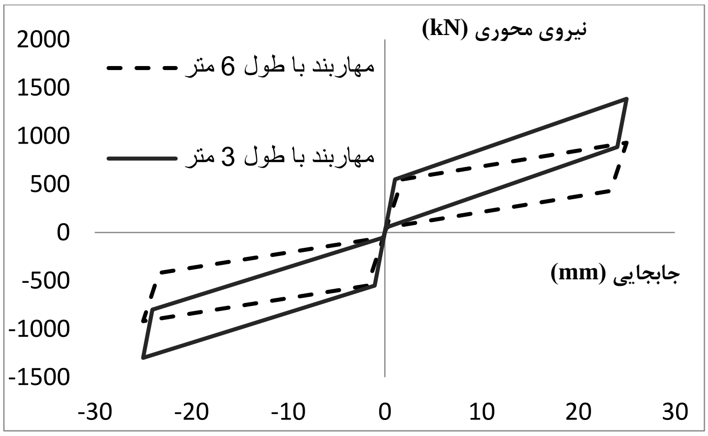
شکل (٤): مدل سازه‌ای مهاربند پیشنهادی (DT-SCED) برای محاسبهٔ نمودار چرخه‌ای در نرم‌افزار OPENSEES



شکل (٥): نمودار چرخه‌ای نیرو جابه‌جایی جهت صحّت‌سنجی نرم‌افزار، الف) نمونهٔ واقعی آزمایش‌شده توسط اروکو و همکاران در سال ۲۰۱٤، ب) نمونه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار OPENSEES



شکل (٦): نمودار چرخه‌ای نیرو جابه‌جایی جهت صحّت‌سنجی نرم‌افزار، الف) نمونۀ واقعی آزمایش‌شده توسط اروکو و همکاران در سال ٢٠١٤، ب) نمونه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار OPENSEES



شکل (٧): رفتار چرخه‌ای مهاربند (DT-SCED) در طول‌های مختلف

نمودار چرخه‌ای مهاربند (DT-SCED)

پس از صحّت‌سنجی نرم‌افزار و نحوۀ مدل‌سازی مهاربندهای تلسکوپی، دو نمونه مهاربند (DT-SCED) را برای محاسبه رفتار چرخه‌ای مورد بررسی قرار دادیم. یکی از مهاربندها دارای طول ٣٠٠٠ میلی‌متر و طول مهاربند مرکزگرای دیگر ٦٠٠٠ میلی‌متر است. در هردوی این مهاربندها از فولاد نرمه با مدول الاستیستۀ ٢٠٠٠٠٠ مگاپاسکال برای کلیۀ عضوهای داخلی، خارجی و اتصالات استفاده شده است.

مدول الاستیسیتۀ کابل‌ها ١٠٢٠٠٠ مگاپاسکال است و مساحت کل کابل‌ها به همراه نیروی پیش‌تنیدگی به ترتیب ٩٠٧ میلی‌متر مربع و ٣٠٠ کیلو نیوتن است. شکل (٨) نمودار چرخه‌ای تئوری مهاربندهای پیشنهادی با طول‌های مختلف را نمایش می‌دهد. شایان یادآوری است که این نمودارها با توجّه به روابط عددی و از مدل‌سازی به‌صورت فنرهای سری و موازی حاصل شده است. برای محاسبه رفتار چرخه‌ای مهاربندهای فوق پس از راستی-آزمایی برنامۀ OPENSEES و محدود نمودن جابه‌جایی مهاربند پیشنهادی، یک بار رفت و برگشتی از نوع جابه‌جایی به مهاربندها اعمال گردید. شکل (٧) نمودار چرخه‌ای مهاربندهای نمونه را با دو طول متفاوت نمایش می‌دهد. جزییات مهاربندها در جدول (١) ارائه گردیده است.

جدول (۱): جزئیات و پارامترهای مهاربند (DT-SCED)

پارامترها	مهاربند پیشنهادی	
	مهاربند با طول ٦ متر	مهاربند با طول ۳ متر
مدول یانگ فولاد (E_S)	200000 MPa	200000 MPa
مدول یانگ کابل (E_p)	102000 MPa	102000 MPa
طول عضو داخلی (L_i)	6000 mm	3000 mm
سطح مقطع عضو داخلی (A_i)	30345 mm^2	20412 mm^2
طول عضو خارجی (L_o)	6000 mm	3000 mm
سطح مقطع عضو خارجی (A_o)	33930 mm^2	21419 mm^2
اصطکاک ابتدای مهاربند (F_{f1})	710 kN	570 kN
اصطکاک انتهای مهاربند (F_{f2})	146 kN	118 kN
سطح مقطع کابل‌ها (A_{pt})	1836 mm^2	1836 mm^2
نیروی پیش‌تنیدگی (P_{po})	870 kN	530 kN
نیروی پیش‌تنیدگی در هر گام	0.1 kN	0.1 kN
میزان تغییر شکل در هر گام	0.005 mm	0.005 mm

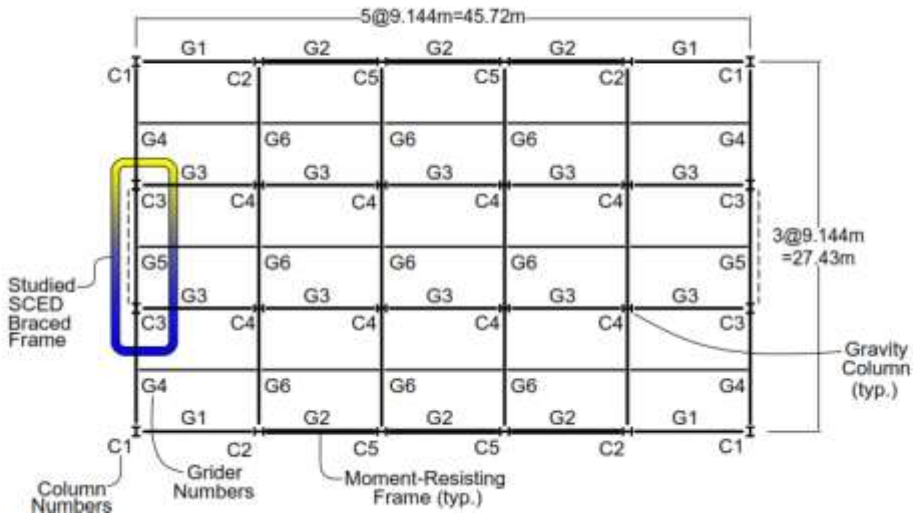
مدل‌سازی ساختمان نمونه

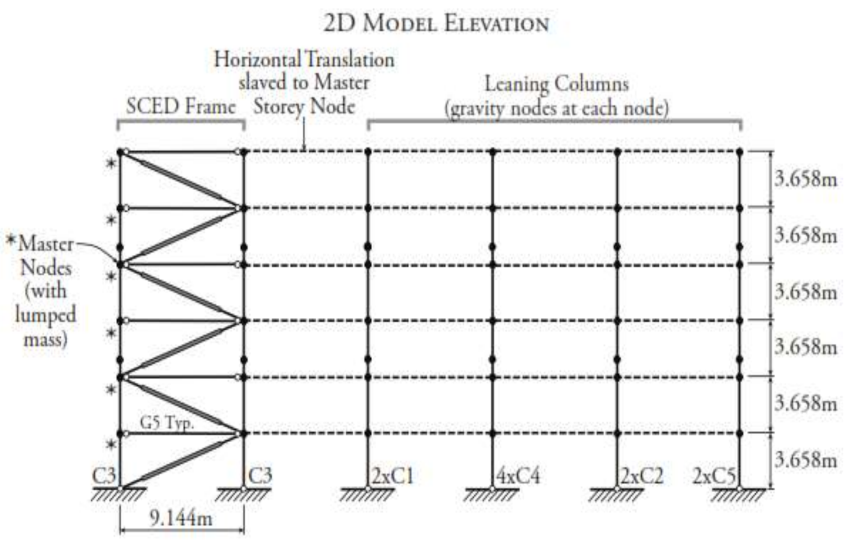
در این پژوهش برای بررسی رفتار لرزه‌ای مهاربند (DT-SCED) در سازهٔ واقعی از یک قاب نمونهٔ شش طبقه همراه با مهاربند مرکزگرا که اوّلین بار توسط کریستوپلوس و همکاران در سال ۲۰۰۸ مورد بررسی قرار گرفت، استفاده گردید [16]. نتایج به‌دست‌آمده با دو نمونهٔ پژوهشی دیگر که توسط کریستوپلوس و همکاران در سال ۲۰۰۸ و اروکو و همکاران در سال ۲۰۱٤ بر روی همان ساختمان پژوهشی صورت پذیرفته بود، مقایسه گردید [17]. در این پژوهش منظور از مهاربند SCED‏(Self-Centering Energy-Dissipative)، مهاربند معرفی‌شده توسط کریستوپلوس و همکاران در سال ۲۰۰۸ است. همچنین منظور از مهاربند T-SCED ‏(Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative)، مهاربند معرفی‌شده توسط اروکو و همکاران در سال ۲۰۱٤ است. بایستی خاطرنشان نمود برای طراحی این سازه از آیین‌نامه ASCE 7-05 استفاده شده است [12]. ساختمان یادشده با خاک نوع ٤ و در شهر لوس‌آنجلس ایالت کولورادو آمریکا در نظر گرفته شده است. ضریب رفتار قاب مذکور ($R=7$)، ضریب اضافه مقاومت ($\Omega_0=2$) و ضریب شکل‌پذیری آن ($C_d=5.5$) مشابه با مهاربند کمانش تاب در نظر گرفته شده است. تیرها و ستون‌ها در قاب مذکور فولادی بوده و سقف‌ها بتنی و صلب در نظر گرفته شده است. همچنین وزن مؤثر نصف سازه ۳۲۱۰۰ کیلونیوتن است. پلان و برش سازه در شکل (۸) ارائه شده است. سیستم باربر جانبی برای سازه در جهت شمال به جنوب مهاربند مرکزگرا و در جهت شرق به غرب قاب خمشی است. پس‌ازآنکه طراحی سازه بر اساس آیین‌نامه ASCE صورت گرفت، قاب دهانهٔ مهاربندی به‌صورت دوبعدی در نرم‌افزار اجزای محدود OPENSEES مدل‌سازی گردید. این قاب دوبعدی بر اساس مدل سه‌بعدی سازه در نظر گرفته شده است. مدل دوبعدی مورد نظر شامل عضوهای تیر، ستون و مهاربند است و بارهای مرده و زنده نیز به تمامی ستون‌ها به‌صورت عمودی اختصاص یافته است. همچنین بایستی خاطرنشان نمود در این مدل‌سازی اثر P-Δ نیز در نظر گرفته شده است و با توجّه به سقف دال بتنی سازه، کلیهٔ کف‌ها در نرم‌افزار به‌صورت یک دیافراگم صلب در نظر گرفته شده است. همچنین میرایی رایلی قاب برای دو مورد اوّل سازهٔ ۳ در نظر گرفته شده است و علّت آن مقدار میرایی در نظر گرفته شده در مطالعات قبلی برای مقایسه بهتر بوده است.

مدل‌سازی مهاربند مرکزگرا (DT-SCED)

برای مدل‌سازی مهاربند مرکزگرا در گام اول نمودار چرخه‌ای هریک از مهاربندهای طبقات محاسبه گردید. برای این منظور از مقدار نیروی جانبی در هریک از طبقات استفاده شد و با توجّه به بیشینهٔ نیروی محوری جزئیات مهاربندها مطابق جدول (۲) محاسبه گردید.

پس از محاسبه نمودار چرخه‌ای جزئیات نمودار پرچمی شکل مطابق المان مرکزگرای ایجادشده در نرم‌افزار OPENSEES محاسبه گردید و از این المان در طراحی مهاربند مرکزگرا استفاده شد. پارامترهای نمودار چرخه‌ای برای مهاربندهای مختلف در جدول (۳) گزارش گردیده است.





بارهای ثقلی: بام: بار مرده=4.07 kpa ، بار زنده=0.96 kpa ، طبقات: بار مرده=4.31 kpa ، بار زنده=2.4 kpa ،

مختصات بار جانبی: Los Angeles, CA, S_S = 2.1 g; S_I = 0.8 g, Occupancy Category II, Seismic Use Group I

Imortantce Factor = 1.0, Site Class D, F_a = 1.0; F_v = 1.5, S_{DS} = 1.4 g; S_{DI} = 0.08 g, Seismic Design Category E

Steel: $F_{y = 345 Mpa}$

شکل (۸): پلان و جزئیات ساختمان نمونهٔ شش طبقه مورد بررسی کریستوپلوس و همکاران [17]

جدول (۲): جزئیات و پارامترهای مهاربندهای استفاده‌شده در قاب نمونه

پارامترها	مهاربند SCED	مهاربند T-SCED	مهاربند (DT-SCED)
مدول یانگ فولاد (E_s)	200000 MPa	200000 MPa	200000 MPa
مدول یانگ کابل (E_p)	102000 MPa	102000 MPa	102000 MPa
طول عضو داخلی (L_i)	6500 mm	7000 mm	6500 mm
سطح مقطع عضو داخلی (A_i)	جدول ۳	جدول ۳	جدول ۳
طول عضو میانی (L_m)	–	7000 mm	–
سطح مقطع عضو میانی (A_m)	–	جدول ۳	–
طول عضو خارجی (L_o)	6500 mm	7000 mm	6500 mm
سطح مقطع عضو خارجی (A_o)	جدول ۳	جدول ۳	جدول ۳
اصطکاک ابتدای مهاربند (F_{I1})	جدول ۳	جدول ۳	جدول ۳
اصطکاک انتهای مهاربند (F_{I2})	جدول ۳	جدول ۳	جدول ۳
سطح مقطع کابل‌ها (A_{pt})	جدول ۳	جدول ۳	جدول ۳
نیروی پیش‌تنیدگی (P_{po})	جدول ۳	جدول ۳	جدول ۳
نیروی پیش‌تنیدگی در هر گام	0.1 kN	0.1 kN	0.1 kN
میزان تغییر شکل در هر گام	0.005 mm	0.005 mm	0.005 mm

جدول (۳): جزئیات و پارامترهای مهاربندهای استفاده‌شده در قاب نمونه

مهاربند	مساحت اعضای داخلی، میانی و خارجی (mm^2)			اصطکاک دوسر مهاربند (kN)		سطح مقطع کابل‌ها (mm^2)	نیروی پیش‌تنیدگی (kN)
	A_i	A_m	A_o	F_{I1}	F_{I2}	A_{pt}	P_{po}
مهاربند SCED							
طبقه ۱ و ۲	۲۰۱۰۰	–	۲۰۷۰۰	٤٥۰	٤٥۰	۱۸۳۰	۱۰٥۳
طبقه ۳	۲۰۱۰۰	–	۲۰۷۰۰	٤۰۰	٤۰۰	۱۸۳۰	۸۹٤
طبقه ٤	۲۰۱۰۰	–	۲٦۷۷۰	۳٥۰	۳٥۰	۱۲۲۰	۷۸۷
طبقه ٥	۲۰۱۰۰	–	۲٦۷۷۰	۲٥۰	۲٥۰	۱۲۲۰	٦۱۷
طبقه ٦	۱۳٦۰۰	–	۲٦۷۷۰	۲۰۰	۱٥۰	۹۱۲	۳۹۸
مهاربند T-SCED							
طبقه ۱ و ۲	۱۳٦۰۰	۲٦۷۷۰	۲٦٤۳۱	٤٥۰	۲٥۰	۹۱۲	٥٥۷
طبقه ۳	۱۳٦۰۰	۲٦۷۷۰	۲٦٤۳۱	٤۰۰	۱٥۰	۹۱۲	۳۹۸
طبقه ٤	۲۰۱۰۰	۲٦۷۷۰	۲۹۰٥۰	۳٥۰	۳۰۰	۱۲۲۰	۸٥۱
طبقه ٥	۲۰۱۰۰	۲٦۷۷۰	۲۹۰٥۰	۲٥۰	۲٥۰	۱۲۲۰	٦۱۷
طبقه ٦	۱۳٦۰۰	۲٦۷۷۰	۲٦٤۳۱	۲۰۰	۱٥۰	۹۱۲	۲۹۸
مهاربند (DT-SCED)							
طبقه ۱ و ۲	۱۸۷۷۳	–	۲۲٤۳۲	٤٥۰	٥۰۰	۱٥۰۰	۱۰٥۰
طبقه ۳	۱۸۷۷۳	–	۲۲٤۳۲	٤۰۰	٤۰۰	۱٥۰۰	۷۸۰
طبقه ٤	۱۸۷۷۳	–	۲٥۰۰۰	۳٥۰	۲۰۰	۱۱۰۰	٦۳٥
طبقه ٥	۱۸۷۷۳	–	۲٥۰۰۰	۲٥۰	۲٥۰	۱۱۰۰	٦۳٥
طبقه ٦	۱٥۹۰۰	–	۲۱٤٦۲	۲۰۰	۱٥۰	۸۰۰	٥۰۰

مقایسهٔ نتایج تحلیل قاب‌های نمونه زمان تناوب

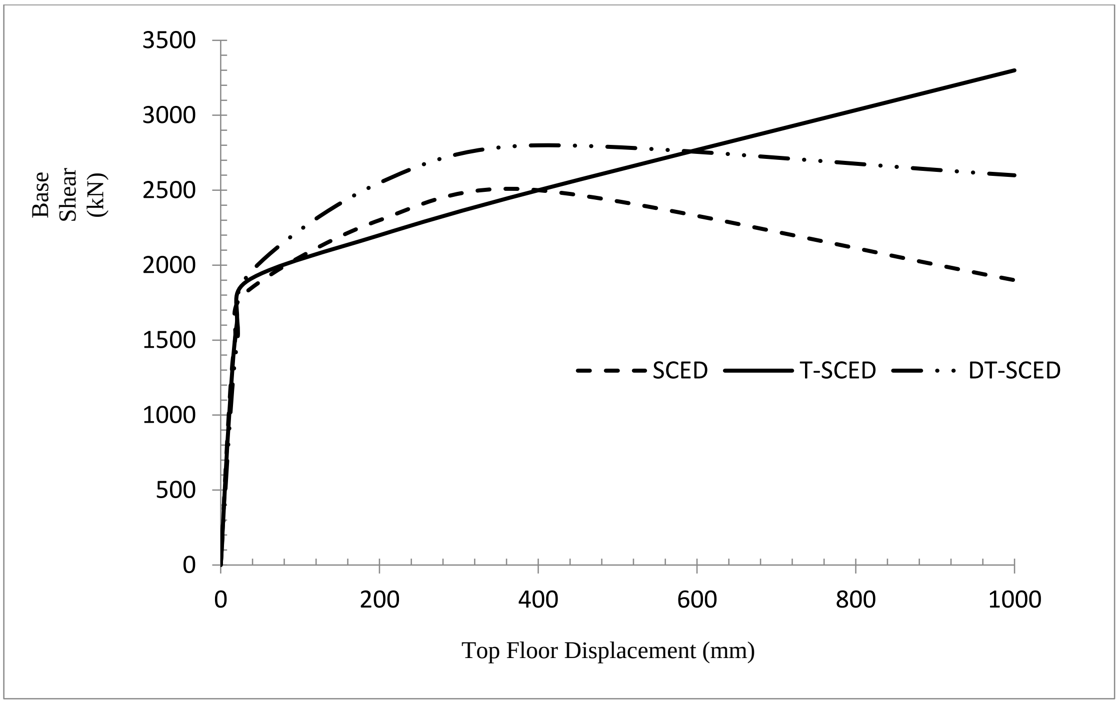
زمان تناوب ۳ مورد اوّل ساختمان‌های طراحی‌شده با سیستم‌های مختلف مهاربندی مرکزگرا در جدول (٤) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمان تناوب ساختمان نمونهٔ پژوهشی همراه با مهاربند (DT-SCED) به نمونه‌های مورد مقایسه نزدیک است.

جدول (٤): زمان تناوب قاب نمونهٔ پیشنهادی و قاب‌های مورد مقایسه

نمونهٔ پژوهشی	مود ۱ (s)	مود ۲ (s)	مود ۳ (s)
کریستوپلوس و همکاران	0.9	0.3	0.17
مهاربند تلسکوپی (تحلیلی)	0.76	0.22	0.12
مهاربند (DT-SCED) (تحلیلی)	0.81	0.24	0.14

تحلیل استاتیکی غیر خطی

نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی قاب نمونه در شکل (۹) و جدول (۵) مشخص گردیده است. ازآنجایی‌که اصطکاک داخلی هر سه مهاربند مورد بررسی، تقریباً یکسان است، هر سه نمودار شیب اولیه و نقطهٔ تسلیم یکسانی دارند. در ساختمان‌های همراه با مهاربندهای DT-SCED و SCED پس از غلبهٔ نیروی جانبی به نیروی پیش‌تنیدگی کابل‌ها، نمودار پوش‌آور نزولی می‌شود و سختی آن کاهش می‌یابد. همچنین با توجّه به آنکه در مهاربند T-SCED از یک عضو میانی در ساختار مهاربند استفاده شده است، ساختمان نمونه همراه با مهاربند (T-SCED) پس از نقطهٔ تسلیم اولیه روند صعودی دارد. ازآنجایی‌که پارامترهای طراحی لرزه‌ای قاب نمونه پیشنهادی از جمله شکل‌پذیری، ضریب اضافه مقاومت و سختی اولیه مشابه نمونه‌های مورد مقایسه است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مهاربند پیشنهادی در این پژوهش با طراحی و ساختاری ساده‌تر ظرفیت نیروی محوری و عملکرد لرزه‌ای مشابه با نمونه‌های مورد مقایسه دارد.

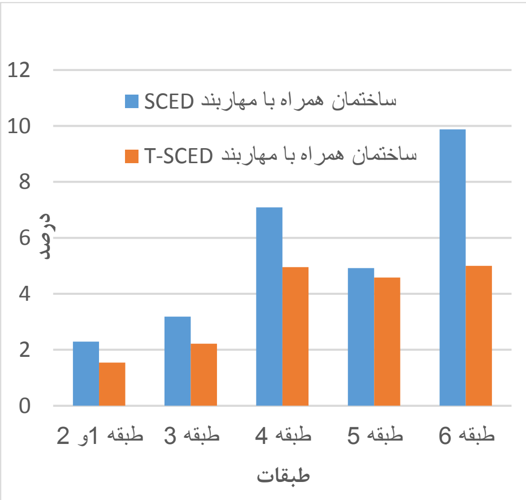


شکل (۹): نمودار پوش‌آور مهاربند (DT-SCED)، مهاربند کریستوپلوس و همکاران و اروکو و همکاران

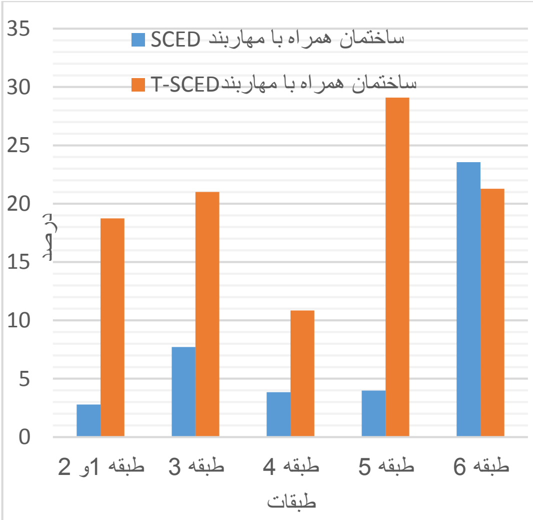
جدول (۵): نتایج تحلیل قاب نمونهٔ پیشنهادی و قاب‌های پیشین

مهاربند	نیروی فعّال شدن مهاربند (kN)	سختی داخلی (kN/mm)	نیروی پیش‌تنیدگی (kN/mm)	بیشینه نیروی محوری (kN)
مهاربند SCED				
طبقه ۱ و ۲	۱۹٦٤	٤۹٤	۱۷	۳۱۳۲
طبقه ۳	۱۷۰۳	٤٦۸	۱۵	۲۷۱۵
طبقه ٤	۱٤۸۱	٤۱۱	۱٤	۲٤۰٤
طبقه ۵	۱۱٤۱	۳٦۱	۱۰	۱۷۸٦
طبقه ٦	۷۲۱	۲۲۱	۵	۱۰۷٤
مهاربند T-SCED				
طبقه ۱ و ۲	۱۹۷۹	۸۸۵	۲۷	۳۸۲٦
طبقه ۳	۱۷۲۰	۸۸۵	۲۷	۳۵٦۰
طبقه ٤	۱۵۱۵	۹۱٤	۱۸	۲۷۷۱
طبقه ۵	۱۱٤۵	۹۱٤	۱۸	۲٤۰۱
طبقه ٦	۷٦۰	۷٦٦	۱٤	۱۷۰٤
مهاربند (DT-SCED)				
طبقه ۱ و ۲	۲۰۱۰	۵۵۰	۱٦	۳۲۲۲
طبقه ۳	۱۷۵۹	۵۸۰	۱٦	۲۹٤۲
طبقه ٤	۱۵۹٤	٤۹۰	۱٤	۲۵۰۰
طبقه ۵	۱۲۰۰	٤۱۰	۱۲	۱۸٦۰
طبقه ٦	۸۰۰	۳۲۰	٦	۱٤۰۵

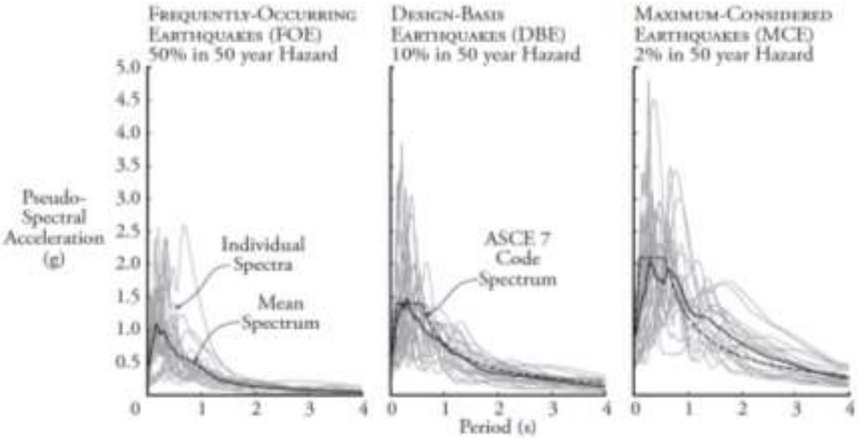
نیروی فعّال شدن مهاربند و میزان سختی داخلی. همان‌طور که در شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود، میزان اختلاف نیروی فعّال شدن مهاربند (DT-SCED) در مقایسه با دو نمونهٔ دیگر بین ۱/۵ تا ۹/۸ درصد است. این مقایسه نشان می‌دهد شروع عملکرد مهاربند (DT-SCED) با نمونه‌های پیشین برابر است و درنتیجه همان‌طور که در شکل (۹) قابل ملاحظه است شیب اولیه و حد پلاستیک نمودار پوش‌آور هر سه نمونه تقریباً برابر است. همچنین بایستی خاطرنشان نمود سختی داخلی مهاربندها متناسب با نحوهٔ ساخت و میزان پیش‌تنیدگی کابل‌های استفاده‌شده متفاوتند اما نسبت آنها نیز تقریباً برابر است.



شکل (۱۰): میزان درصد اختلاف نیروی فعّال شدن مهاربند DT-SCED با مهاربندهای SCED و T-SCED



شکل (۱۱): میزان درصد اختلاف بیشینهٔ نیروی محوری مهاربند DT-SCED با مهاربندهای SCED و T-SCED



شکل (۱۲): طیف شبه‌شتاب زمین‌لرزه‌ها را بر اساس آیین‌نامه ASCE برای سطوح خطرپذیری مختلف [12]

نیروی پیش‌تنیدگی و بیشینه نیروی محوری. همان‌طور که در مقدّمه بیان شد، ظرفیت نیروی محوری مهاربندهای مرکزگرا همواره یکی از مهم‌ترین نکات طراحی این مهاربندها است. شکل (۱۱) میزان درصد اختلاف بیشینهٔ نیروی محوری (DT-SCED) را نمایش می‌دهد و مشاهده می‌شود میزان اختلاف بین ۳ تا ۲۸ درصد است؛ بنابراین مهاربند (DT-SCED) با مکانیزم ساخت بسیار ساده‌تر از ظرفیت نیروی محوری مناسب برخوردار است.

تحلیل دینامیکی غیر خطی

در این پژوهش از ۶۰ زمین‌لرزه استفاده‌شده توسط Somerville و همکاران در سال ۱۹۹۷ برای پروژه SAC، استفاده شد. زمین‌لرزه‌های SAC برای منطقه لوس‌آنجلس در سه سطح خطرپذیری کالیبره شده است. بیست زمین‌لرزه (LA41 to LA60) برای سطح خطرپذیری با احتمال تکرار (FOE) با احتمال وقوع ۵۰٪ در ۵۰ سال کالیبره گردیدند. بیست زمین‌لرزه (LA01 to LA20) برای سطح خطرپذیری طراحی (DBE) با احتمال وقوع ۱۰٪ در ۵۰ سال کالیبره گردیدند. بیست زمین‌لرزه نیز (LA21 to LA40) برای بیشترین سطح خطرپذیری (MCE) با احتمال وقوع ۲٪ در ۵۰ سال در نظر گرفته شده است. شکل (۱۲) نیز طیف شبه‌شتاب زمین‌لرزه‌ها را بر اساس آیین‌نامهٔ ASCE برای هر سه سطح خطرپذیری

نمایش می‌دهد [12].

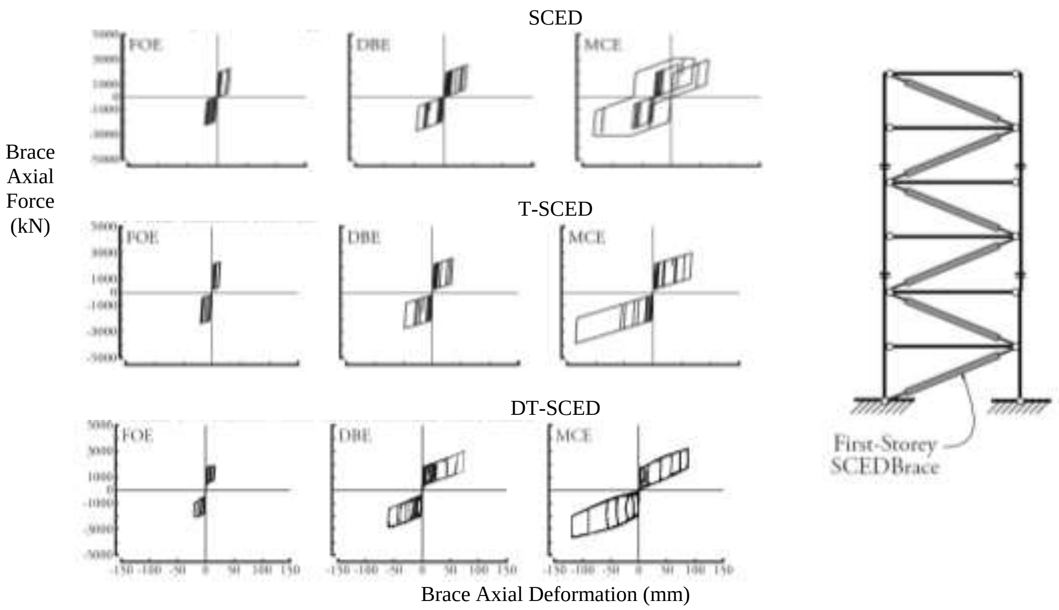
مقایسه رفتار چرخه‌ای مهاربندها. در این پژوهش پس از تحلیل قاب‌های نمونه در هر سه سطح خطرپذیری زمین‌لرزه‌ها، رفتار چرخه‌ای مهاربندهای طبقهٔ اوّل با یکدیگر مقایسه گردیدند. شکل (۱۳) نمودار چرخه‌ای مهاربندهای قاب‌های مختلف را نمایش می‌دهد. زمین‌لرزه‌های استفاده‌شده در هریک از سطوح خطرپذیری در جدول (٦) ارائه گردیده است. از مقایسه نمودارهای شکل (۱۳) با یکدیگر موارد زیر را می‌توان نتیجه‌گیری نمود:

۱. در سطح خطرپذیری FOE هر سه مهاربند مرکزگرا رفتار پرچمی شکل دارند. سختی اولیهٔ هر سه مهاربند تقریباً با یکدیگر برابر است، سطح زیر نمودار مهاربند SCED از دو نمونه دیگر بیشتر است که با توجّه به جزییات ساخت قابل پیش‌بینی است. سختی ثانویّهٔ مهاربند DT-SCED در حالت کششی از دیگر نمونه‌ها کمتر است اما در حالت فشاری با دو نمونه دیگر تقریباً برابر است. میزان جابه‌جایی باقی‌مانده در مهاربند DT-SCED از دو نمونه دیگر کمتر است و دلیل آن می‌تواند استفاده از کابل‌های با طول کوتاه‌تر و مجزا در فشار و کشش باشد. به‌صورت کلّی عملکرد مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دو طرفه در این سطح از زمین‌لرزه بسیار مطلوب ارزیابی گردید.

۲. در سطح خطرپذیری DBE نیز هر سه مهاربند مرکزگرا رفتار پرچمی شکل دارند. سختی اولیهٔ مهاربند مرکزگرایDT-SCED از دو نمونه دیگر بیشتر است.

همچنین در مهاربند مرکزگرای DT-SCED سطح زیر نمودار نیز از دو نمونه دیگر بیشتر است. همانند حالت (الف) میزان جابه‌جایی باقی‌مانده در مهاربند DT-SCED از دو نمونه دیگر کمتر است.

۳. در سطح خطرپذیری MCE بر خلاف دو حالت قبل، مهاربند مرکزگرای SCED رفتار پرچمی شکل کامل ندارد و رفتار چرخه‌ای این مهاربند از حالت مرکزگرا خارج می‌گردد. از نکات حائز اهمّیّت مهاربند مرکزگرای تلسکوپی و تلسکوپی دوطرفه که در این پژوهش ارائه گردیده است، پایداری رفتار چرخه‌ای آنها در زلزله‌های با سطح خطرپذیری بالا است. از دیگر نکات مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه DT-SCED می‌توان به تعداد سیکل‌های بیشتر نمودار چرخه‌ای نسبت به مهاربند مرکزگرای تلسکوپی T-SCED اشاره نمود.



شکل (۱۳): رفتار چرخه‌ای مهاربند طبقهٔ اوّل در ساختمان‌های نمونه تحت زمین‌لرزه‌های با سطوح خطرپذیری متفاوت

جدول (٦): زمین‌لرزه‌های منتخب برای تحلیل تاریخچهٔ زمانی در سطوح مختلف خطرپذیری

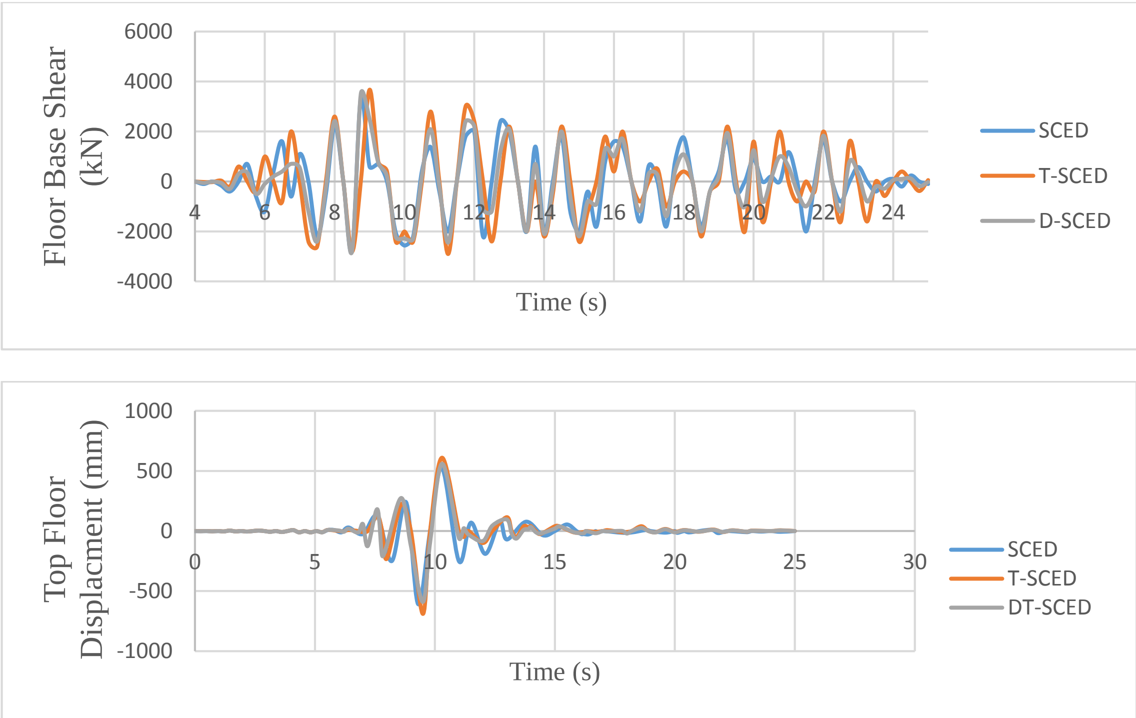
سطح خطرپذیری	نام زمین‌لرزه	تاریخ	بزرگی	فاصله (km)	PGA(g)
FOE	LA51/52	Parkfield,1966	6.1	3.7	0.78/0.63
DBE	LA01/02	Imperial Valley,1940,El Centro	6.9	10	0.46/0.68
MCE	LA21/22	Kobe,1995	6.9	3.4	1.28/0.92

پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های نمونه. در این پژوهش برای بررسی و مقایسهٔ بهتر عملکرد لرزه‌ای مهاربند پیشنهادی مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه DT-SCED از نتایج تحقیقات اروکو و همکاران استفاده شد و با نتایج آن مقایسه گردید [17]. شکل (١٤) نمودار جابه‌جایی بام و برش پایه قاب‌های نمونه را برای زمین‌لرزه LA21/22 نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود رفتار ساختمان نمونه همراه با مهاربند مرکزگرای DT-SCED با دو نمونه دیگر تقریباً برابر است. نتایج تحلیل‌های دینامیکی بر روی ساختمان‌های نمونه در جدول (۷) ارائه گردیده است.

برای بررسی تأثیر هریک از مهاربندهای مرکزگرا بر روی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های نمونه پارامترهای بیشینهٔ شتاب، بیشینهٔ جابه‌جایی نسبی طبقات، بیشینهٔ جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده طبقات و بیشینهٔ برش پایه با یکدیگر مقایسه گردیدند. بیشینهٔ شتاب در ساختمان نمونه همراه با مهاربند مرکزگرای SCED نسبت به دو ساختمان نمونه دیگر کمتر است که این امر می‌تواند ناشی از میرایی بالای این مهاربند نسبت به دو نمونه دیگر باشد. این امر در ساختمان‌های نمونهٔ همراه با مهاربندهای مرکزگرای تلسکوپی T-SCED و DT-SCED باعث افزایش بیشینهٔ برش پایه و جابه‌جایی گردیده است.

شکل (۱۵) نمودار جابه‌جایی طبقات را برای سطوح متفاوت خطرپذیری نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، در سطوح مختلف خطرپذیری زمین‌لرزه‌ها، میزان جابه‌جایی طبقات در ساختمان نمونه همراه با مهاربند مرکزگرای SCED از دیگر نمونه‌ها کمتر است. با مقایسه نمودار جابه‌جایی طبقات مشخص می‌گردد مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه DT-SCED پیشنهادی در این پژوهش از نظر جابه‌جایی طبقات عملکرد لرزه‌ای مناسبی دارد. یکی از مهم‌ترین پارامترهای بررسی رفتار لرزه‌ای که در آیین‌نامه‌ها معرفی گردیده است، جابه‌جایی نسبی طبقات یا DRIFT طبقات است. شکل (١٦) جابه‌جایی نسبی طبقات ساختمان‌های نمونه در سطوح مختلف زمین‌لرزهٔ اعمالی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد.

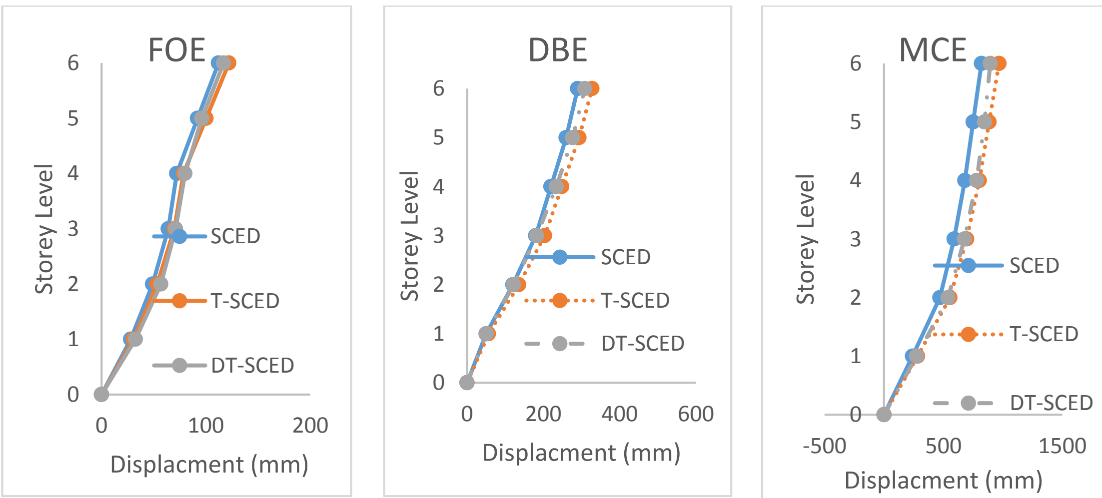
میزان جابه‌جایی نسبی طبقات در ساختمان همراه با مهاربند مرکزگرای DT-SCED نسبت به دو مهاربند دیگر عملکرد مناسبی از نظر لرزه‌ای دارد. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، رفتار مرکزگرا می‌تواند به‌صورت یک عضو یا به‌صورت یک سیستم در سازه عمل نماید. در این پژوهش از یک عضو مرکزگرا به‌عنوان مهاربند در ساختمان‌های نمونه استفاده شد. در شکل (۱۳) مشاهده گردید تمامی مهاربندهای پیشنهادی تقریباً نمودار چرخه‌ای شکل دارند. مطلوب‌ترین عملکرد مهاربندهای مرکزگرا می‌تواند ایجاد رفتار پرچمی شکل در کل ساختمان باشد. برای این منظور در شکل (۱۷) جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده طبقات مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده طبقات در ساختمان‌های همراه با مهاربندهای مرکزگرای T-SCED و DT-SCED نزدیک به صفر است.



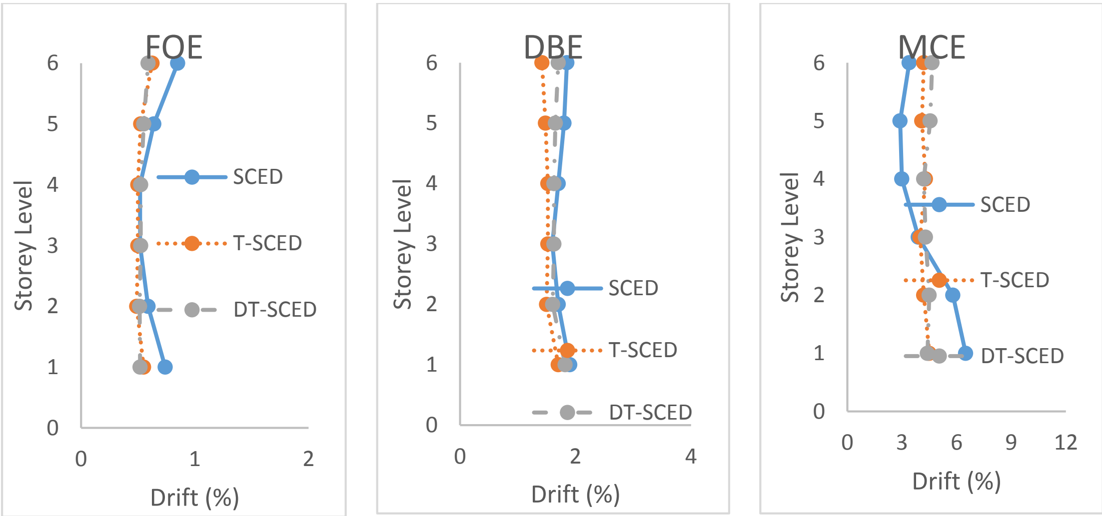
شکل (١٤): نمودار تاریخچهٔ پاسخ ساختمان‌های نمونه تحت زمین‌لرزه LA21/22

جدول (۷): پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌های نمونهٔ همراه با مهاربندهای مرکزگرای SCED، T-SCED و DT-SCED

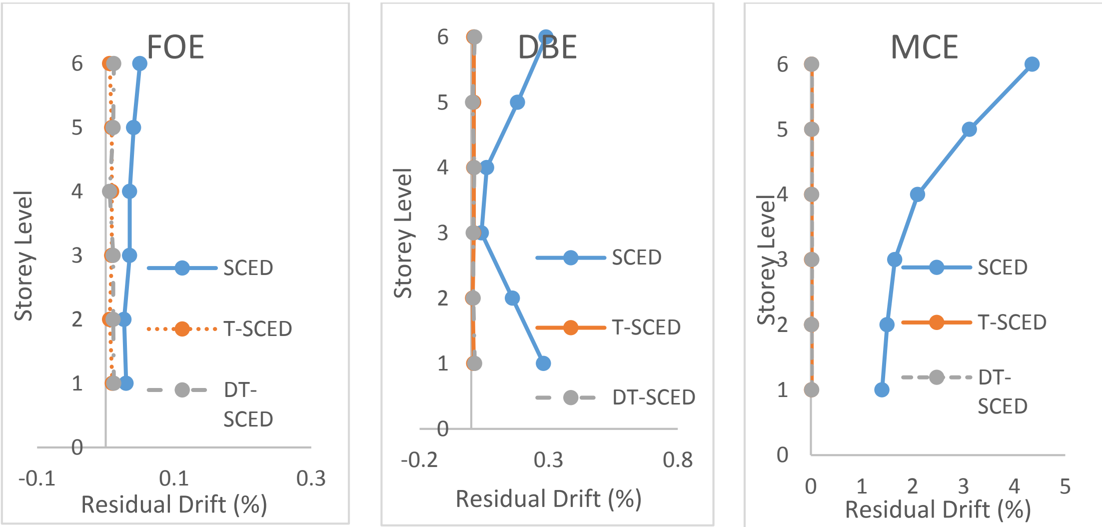
Analysis	Maximum Acceleration (g)			Peak Drift (%)			Peak Residual Drift (%)			Maximum Base Shear (Kn)		
	FOE	DBE	MCE	FOE	DBE	MCE	FOE	DBE	MCE	FOE	DBE	MCE
SCED	0.77	1.25	1.58	0.82	1.87	5.65	0.05	0.29	4.35	2160	2680	3330
T-SCED	1.08	1.64	1.97	0.57	1.79	4.88	0.01	0.01	0.02	2260	2620	3670
DT-SCED	0.92	1.49	1.85	0.59	1.81	4.66	0.012	0.014	0.022	2209	2676	3490



شکل (١٥): نمودار بیشینهٔ جابه‌جایی طبقات ساختمان‌های نمونهٔ همراه با مهاربندهای مرکزگرا



شکل (١٦): نمودار بیشینهٔ جابه‌جایی نسبی طبقات ساختمان‌های نمونهٔ همراه با مهاربندهای مرکزگرا



شکل (١٧): نمودار بیشینهٔ جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده طبقات ساختمان‌های نمونهٔ همراه با مهاربندهای مرکزگرا

نتیجه گیری

هدف کلّی در این پژوهش معرفی و طراحی یک نمونه مهاربند مرکزگرا با ساختار ساده‌تر نسبت به نمونه‌های پیشین و دارای امکان ساخت در ایران بود. پس از بررسی تمامی مهاربندهای مرکزگرای پیشین نمونه‌ای پیشنهاد گردید که ساختار آن از ترکیب دو نمونه مهاربند معرفی‌شده توسط ژو و ژانگ در سال ۲۰۰۸ و اروکو و همکاران در سال ۲۰۱۳ نشأت گرفته بود [8,13]. مهاربند پیشنهادی در این پژوهش نسبت به نمونه‌های پیشین از دو جنبهٔ ساختاری و تحلیلی توسعه یافت. از لحاظ ساختاری با اعمال تغییراتی در ساختار مهاربند علاوه بر سادگی ساخت، امکان تولید آن در کشور ایران فراهم گردید. ظرفیت نیروی محوری تا ۱۰۰۰ کیلونیوتن افزایش یافت و مصرف کابل نیز ٪۴۰ نسبت به نمونه T-SCED کاهش یافت. درعین‌حال از کابل‌های جداگانه برای تحمل نیروی کششی و فشاری در مهاربند پیشنهادی استفاده شد. این موضوع سبب کاهش خستگی سیکل‌های نمودار چرخه‌ای مهاربند (DT-SCED) گردید. از لحاظ تحلیلی نیز با ساخت مدل یک‌بعدی مهاربند پیشنهادی در نرم‌افزار OPENSEES نمودار چرخه‌ای تنش کرنش

مهاربند محاسبه گردید. در این برنامه با تغییر پارامترهای مهاربند از جمله طول، سطح مقطع اعضای داخلی و خارجی، سطح مقطع و طول کابل‌ها می‌توان نمودار چرخه‌ای مهاربند را ترسیم نمود. همچنین این برنامه می‌تواند در طراحی مهاربند مرکزگرا مورد استفاده قرار گیرد. در گام بعدی نیز برای اطمینان از عملکرد مهاربند پیشنهادی در سازهٔ واقعی، قابی ٦ طبقه مشابه با نمونه‌های مورد بررسی کریستوپلوس و همکاران در سال ۲۰۰۸ و اروکو و همکاران در سال ۲۰۱۳ طراحی و تحلیل گردید [6,13].

پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش برای تحلیل مودال عبارت بود از میزان پریود سازه‌ها. در تحلیل استاتیکی غیرخطی میزان شکل‌پذیری، ضریب اضافه مقاومت، میزان سختی اولیه، ظرفیت نیروی محوری، نیروی فعّال‌شدن مهاربندها و نیروی پیش‌تنیدگی مهاربند با یکدیگر مقایسه گردیدند. همچنین نتایج مقایسه شده در تحلیل دینامیکی عبارت بودند از: بیشینهٔ شتاب، بیشینهٔ جابه‌جایی نسبی طبقات، بیشینهٔ جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده طبقات و بیشینهٔ برش پایه.

با مقایسهٔ نتایج ساختمان‌های نمونه با یکدیگر، موارد زیر نتیجه‌گیری گردید:

۱. ظرفیت نیروی محوری بالا، استفاده از کابل کمتر در مهاربند، سادگی ساخت متناسب با امکانات ساخت در ایران، استفاده از کابل‌های مجزا برای حالت‌های فشاری و کششی مهاربند، خستگی کمتر در کابل‌ها و ایجاد امکان سیکل‌های بیشتر بارگذاری دینامیکی، از مزایای مهاربند DT-SCED است؛

۲. عملکرد لرزه‌ای مهاربند DT-SCED به‌مراتب از مهاربند SCED در ساختمان نمونه بهتر است. در زمین‌لرزه‌های با سطح خطرپذیری MCE مهاربند DT-SCED بر خلاف مهاربند SCED رفتار کاملاً مرکزگرا دارد و جابه‌جایی باقی‌مانده نسبی ساختمان تقریباً نزدیک به صفر است؛

۳. عملکرد لرزه‌ای مهاربند DT-SCED با مهاربند T-SCED تقریباً مشابه است. میزان جابه‌جایی طبقات در ساختمان همراه با مهاربند DT-SCED نسبت به ساختمان همراه با مهاربند T-SCED کمتر است که این موضوع می‌تواند به علّت استفاده از کابل‌های مجزا در حالت فشاری و کششی باشد.

پس از بررسی نتایج به‌دست‌آمده از مقایسهٔ عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های نمونه با یکدیگر، عملکرد مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه DT-SCED بسیار مثبت ارزیابی گردید.

مراجع

1. Nims, D.K., Richter, P.J., & Bachman, R.E., "The Use of the Energy Dissipating Restraint for Seismic Hazard Mitigation". Earthquake Spectra, 9(3), 467-489, (1993).
2. Tsopelas, T., Constantinou, M.C., "Experimental and Analytical Study of a System Consisting of Sliding Bearings and Fluid Restoring Force/Damping Devices". Eng., State University of New York at Buffalo, (1994).
3. Filiatrault, A., Tremblay, R., & Kar, R., "Performance Evaluation of Friction Spring Seismic Damper". *J. Struct. Eng.* 126 (4), 491-499, (2000).
4. Christopoulos, C., Filiatrault, A., & Folz, B., "Seismic response of self-centring hysteretic SDOF systems". Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 31(5), 1131-1150, (2002).

5. Christopoulos, C., Filiatrault, A., Uang, C-M., & Folz, B., "Posttensioned Energy Dissipating Connections for Moment-Resisting Steel Frames". *J. Struct. Eng.* 128(9), 1111-1120, (2002).
6. Christopoulos, C., Tremblay, R., Kim, H.-J., & Lacerte, M., "Self-Centering Energy Dissipative Bracing System for the Seismic Resistance of Structure: Development and Validation". *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 96-107, (2008).
7. Rojas, P., Ricles, J.M., & Sause, R., "Seismic Performance of Post-tensioned Steel Moment Resisting Frames With Friction Devices". *J. Struct. Eng.* 131 (4), 529-540, (2005).
8. Zhu, S., & Zhang, Y., "Seismic Analysis of Concentrically Braced Frame Systems with SelfCentering Friction Damping Braces". *J.Struct.Eng.* 134(1), 121-131, (2008).
9. Erochko, J., Christopoulos, C., & Tremblay, R., "Design and Testing of an Enhanced-Elongation Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace". *J. Struct. Eng.* 137 (5), 589-599, (2011).
10. Alam, S., Rafiqul Haque, A."Cyclic Performance of a Piston Based Self-Centering Bracing System", Structures Congress, 1:2360-2372, (2015).
11. Erochko, j.Christopoulos, C., Tremblay, R., "Design, Testing, and Detailed Component Modeling of a High-Capacity Self-Centering Energy-Dissipative Brace", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 131:370-381, (2014).
12. ASCE., "Minimum design loads for buildings and other structures". SEI/ASCE standard No. 7-05, ASCE, Reston, Va, (2005).
13. Erochko, J., Christopoulos, C., & Tremblay, R., "Residual Drift Response of SMRFs and BRB Frames in Steel Buildings Designed according to ASCE 7-05". *J. Struct. Eng.* 137 (5), 589-599, (2011).
14. Rosenblueth E, & Meli R., "The 1985 Mexico earthquake: causes and effects in Mexico City". Concrete International, 8(5), 23–34, (1986).
15. McCormick, J., Aburano, H., Ikenaga, M., and Nakashima, M., "Permissible Residual Deformationn Levels for Building Structures Considering Both Safety and Human Elements". Proc. *14th World Conf. Earthquake Engng, Beijing, China.* Paper No. 05-06-0071, (2008).
16. Choi, H., Erochko, J., Christopoulos, C., & Tremblay, R., "Comparison of the Seismic Response of Steel Buildings Incorporating Self-Centering nergy-Dissipative Dampers", Toronto: Dept. of Civ. Eng., University of Toronto, ON, (2008).
17. Jeffrey A. Erochko., "Improvements to the Design and Use of Post-Tensioned Self-Centering Energy-Dissipative (SCED) Braces ". Toronto: Dept. of Civ. Eng., University of Toronto, (2013).